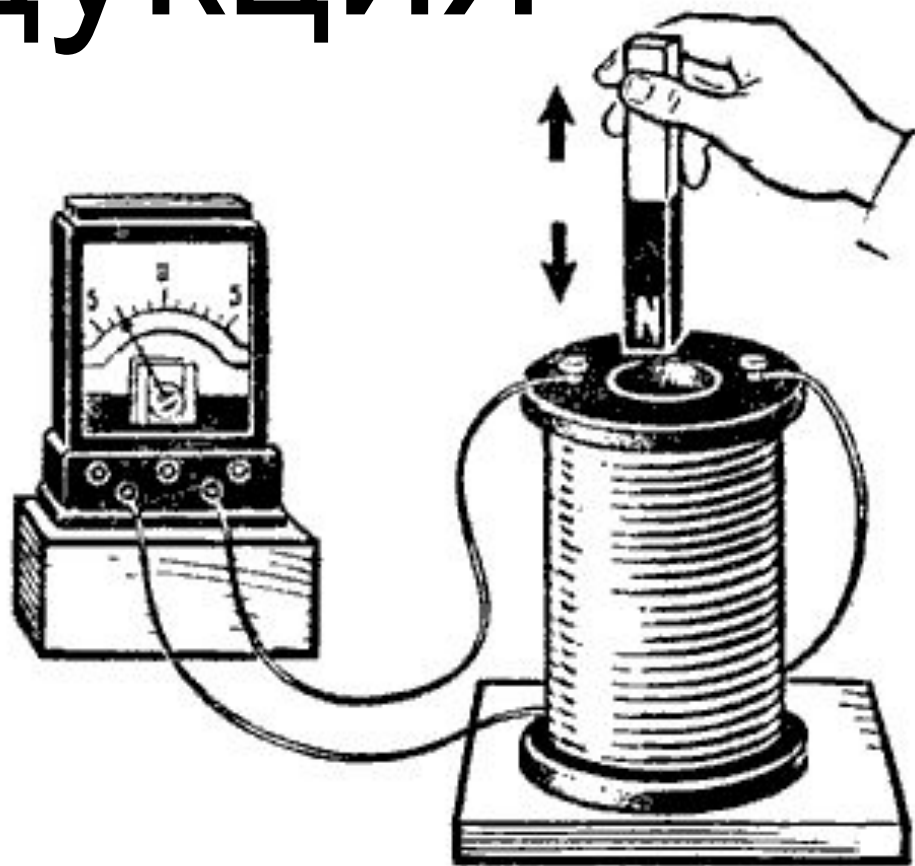


Электромагнитная индукция



1. Поток вектора магнитной индукции

$d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{S} = B_n \cdot dS$ - поток вектора магнитной индукции B через площадку dS (магнитный поток),

Магнитный поток – это скалярная физическая величина, равна скалярному произведению вектора магнитной индукции на вектор площади контура.

$B_n = B \cos \alpha$ - проекция вектора B на направление нормали к площадке dS

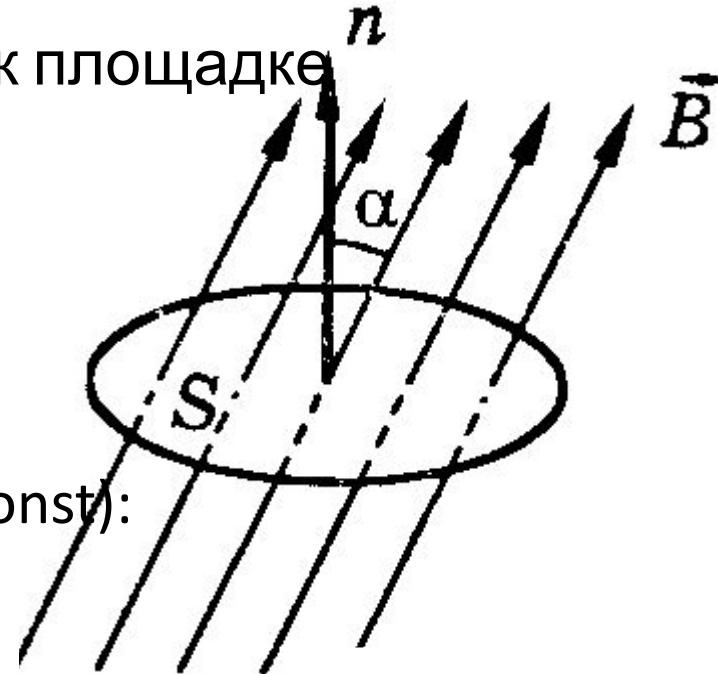
α – угол между вектором B и нормалью к площадке

Поток вектора магнитной индукции B через произвольную площадь S :

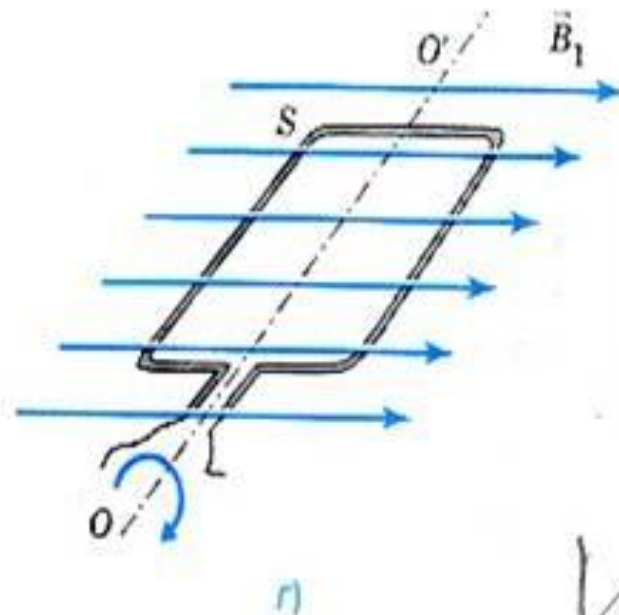
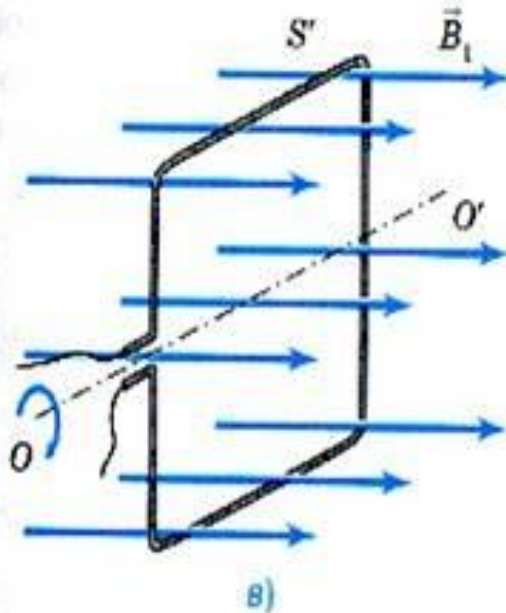
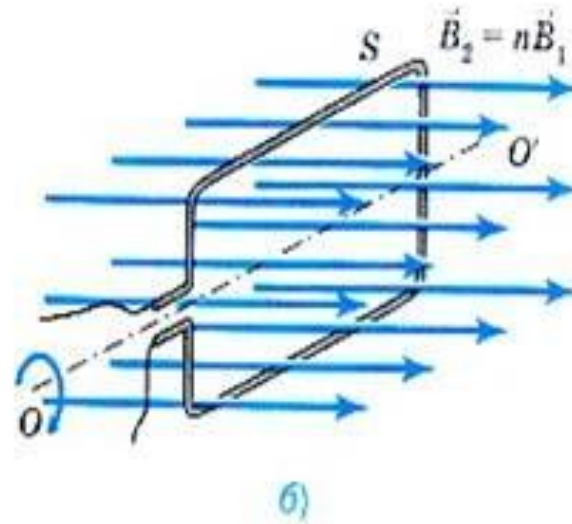
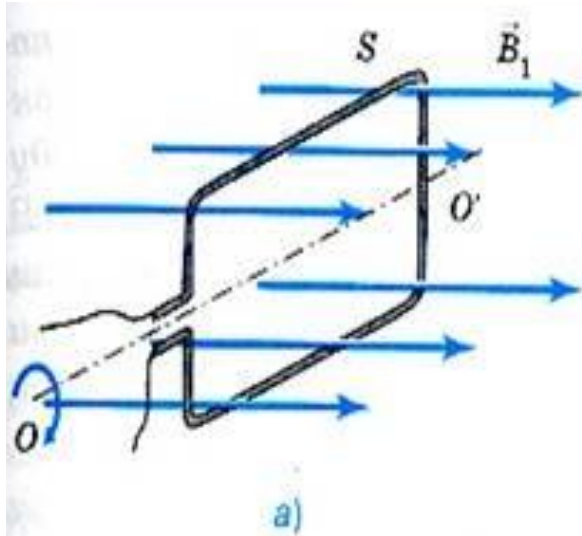
$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S B_n \cdot dS$$

Если магнитное поле однородное ($B = \text{const}$):

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$



На каком рисунке поток вектора \vec{B} наибольший? Наименьший?



Поток вектора В сквозь соленоид

Магнитный поток сквозь один виток соленоида площадью S (поле внутри соленоида однородное и сонаправлено с нормалью к контуру):

$$\Phi_1 = B \cdot S$$

Где $B = \frac{\mu_0 IN}{l}$ - магнитная индукция внутри соленоида

Полный магнитный поток, сцепленный со всеми N витками соленоида, - **потокосцепление Ψ** :

$$\psi = N \cdot \Phi_1 = N \cdot B \cdot S$$

$\psi = \mu\mu_0 \frac{N^2 IS}{l}$ - полный магнитный поток вектора B сквозь соленоид

2. Явление электромагнитной

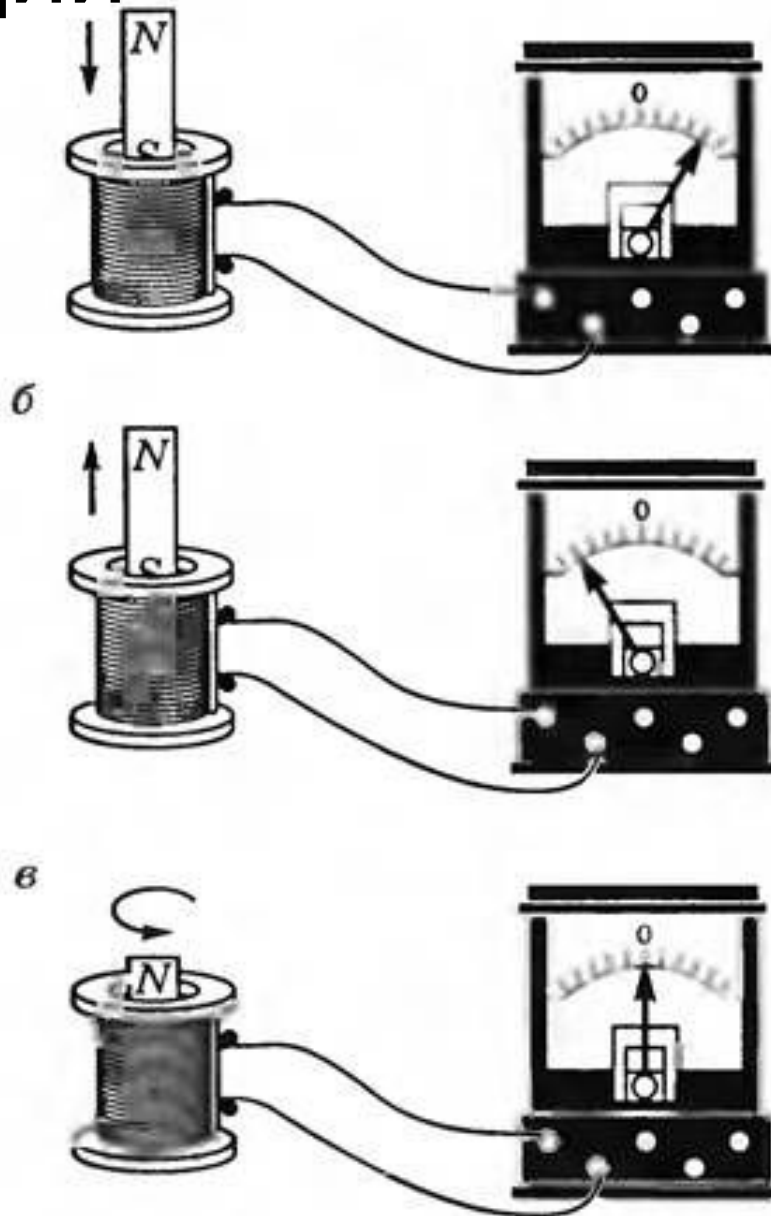
ИНДУКЦИИ

Открыто М. Фарадеем в 1831 г.

В замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока, охватываемого этим контуром, возникает электрический ток, называемый **индукционным**.

Значение индукционного тока не зависит от способа изменения магнитного потока, а зависит от скорости его изменения.

Фарадеем установлена связь между электрическими и магнитными явлениями.



Опыты Фарадея

**T21.1 ОПЫТЫ
ФАРАДЕЯ**

Закон Фарадея

I_i - сила индукционного тока

Согласно закону Ома $I_i = \frac{\varepsilon_i}{R}$ где ε_i – ЭДС индукции, [В]
 R – сопротивление проводника

Закон Фарадея: ЭДС индукции, возникающая в замкнутом контуре, прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока (независимо от причины его изменения).

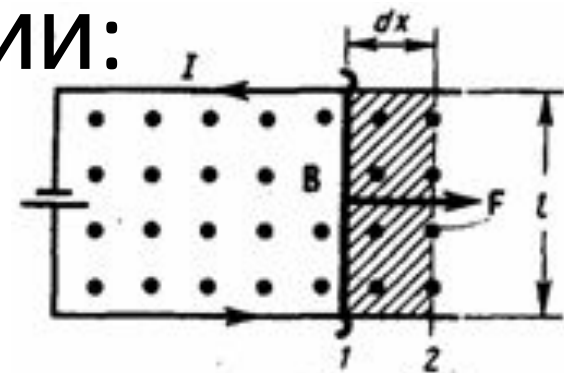
$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{- Закон Фарадея}$$

$\frac{d\Phi}{dt}$ - скорость изменения магнитного потока

Знак «-» показывает, что при увеличении магнитного потока ($d\Phi/dt > 0$), поле индукционного тока направлено навстречу ему ($\varepsilon_i < 0$).

Вывод закона Фарадея из закона сохранения энергии:

Пусть проводник с током I помещен в однородное магнитное поле, перпендикулярное плоскости контура и может свободно перемещаться. При этом сила Ампера совершает работу $dA = I d\Phi$.



Работа источника за время dt складывается из работы на джоулеву теплоту ($I^2 R dt$) и работы перемещения проводника

$$(\varepsilon \cdot I) \cdot dt = I^2 \cdot R \cdot dt + I \cdot d\Phi$$

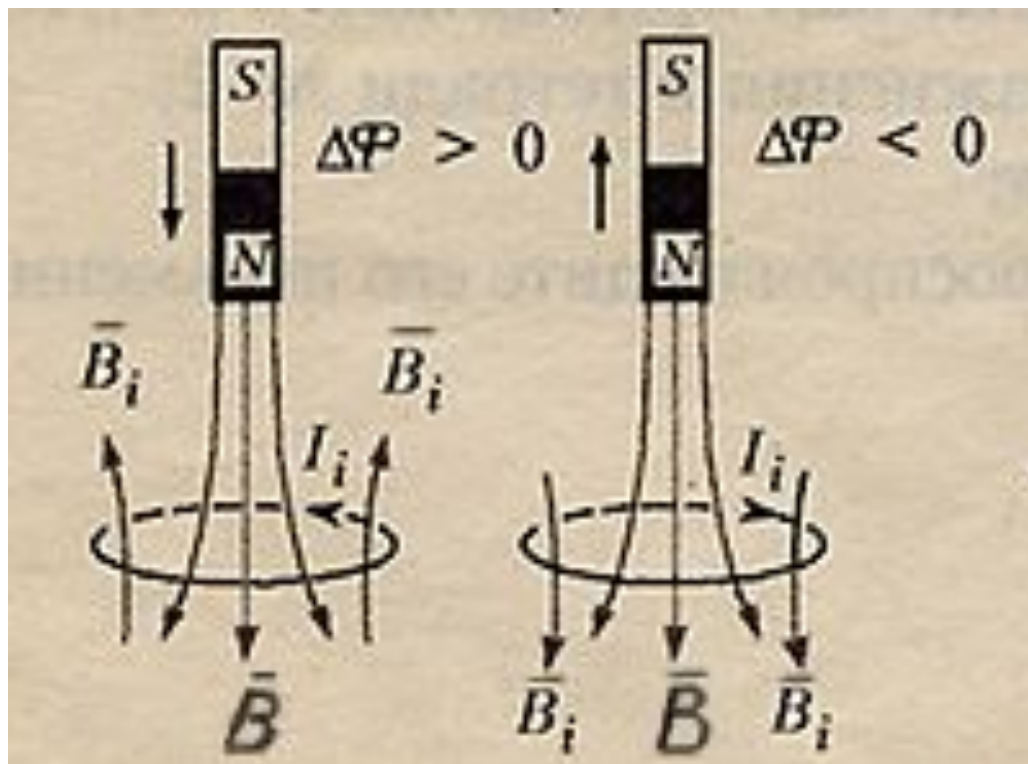
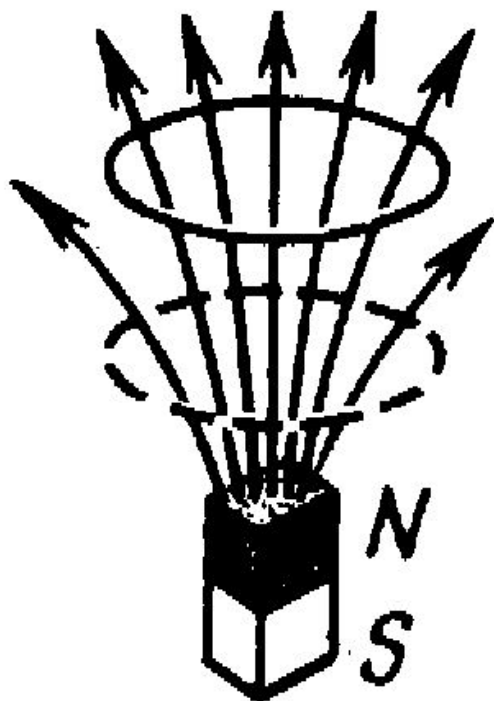
$$I = \frac{(\varepsilon - \frac{d\Phi}{dt})}{R}$$

Где $\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}$ - закон Фарадея

ε – ЭДС источника тока,
 R – полное сопротивление контура,
 $d\Phi$ – пересеченный проводником магнитный поток,
 I – сила тока

Правило Ленца для нахождения направления индукционного тока:

Индукционный ток, возникающий при относительном движении проводящего контура и источника магнитного поля, всегда имеет такое направление, что его собственный магнитный поток компенсирует изменения внешнего магнитного потока, вызвавшего этот ток.



T 21.4

**ДВИЖЕНИЕ
МЕТАЛЛИЧЕСКОГО
КОЛЬЦА В ИЗМЕНЯ-
ЮЩЕМСЯ МАГНИТНОМ
ПОЛЕ**

/ К ПРАВИЛУ ЛЕНЦА /

T 21.2

**ОПЫТЫ
С ТРАНСФОРМАТОРОМ
ТОМСОНА**

Алгоритм применения правила Ленца для нахождения направления индукционного тока:

- 1) Определить направление внешнего магнитного поля B ;
- 2) Определить увеличивается или уменьшается поток вектора B сквозь контур;
- 3) Если поток вектора B увеличивается, то направление магнитного поля индукционного тока B_i противоположно внешнему полю,
Если поток вектора B уменьшается, то направление магнитного поля индукционного тока B_i сонаправлено с внешним полем;
- 4) Зная направление вектора B_i , определить направление индукционного тока по правилу буравчика (правой руки).

Применение закона Фарадея

А) ЭДС в рамке, вращающейся в магн. поле:

Пусть рамка площадью S вращается в однородном магнитном поле ($B = \text{const}$) с постоянной угловой скоростью ($\omega = \text{const}$).

Угол поворота рамки в момент времени t : $\alpha = \omega \cdot t$ ($\alpha_0 = 0$)

Рамку пронизывает магнитный

$$\Phi_B = B_n \cdot S = B \cdot S \cdot \cos \alpha = B \cdot S \cdot \cos \omega t$$

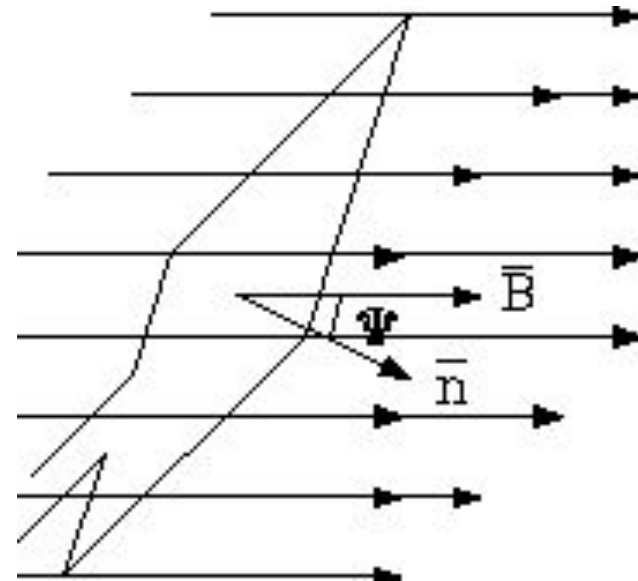
При вращении в рамке возникает ЭДС

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin \omega t = \varepsilon_{\max} \sin \omega t$$

$$\varepsilon_{\max} = B \cdot S \cdot \omega$$

На этом принципе работают генераторы переменного тока.

Частота переменного тока, принятая в России $\nu = \frac{\omega}{2\pi} = 50(\text{Гц})$



Б) ЭДС в проводнике, движущемся в магнитном

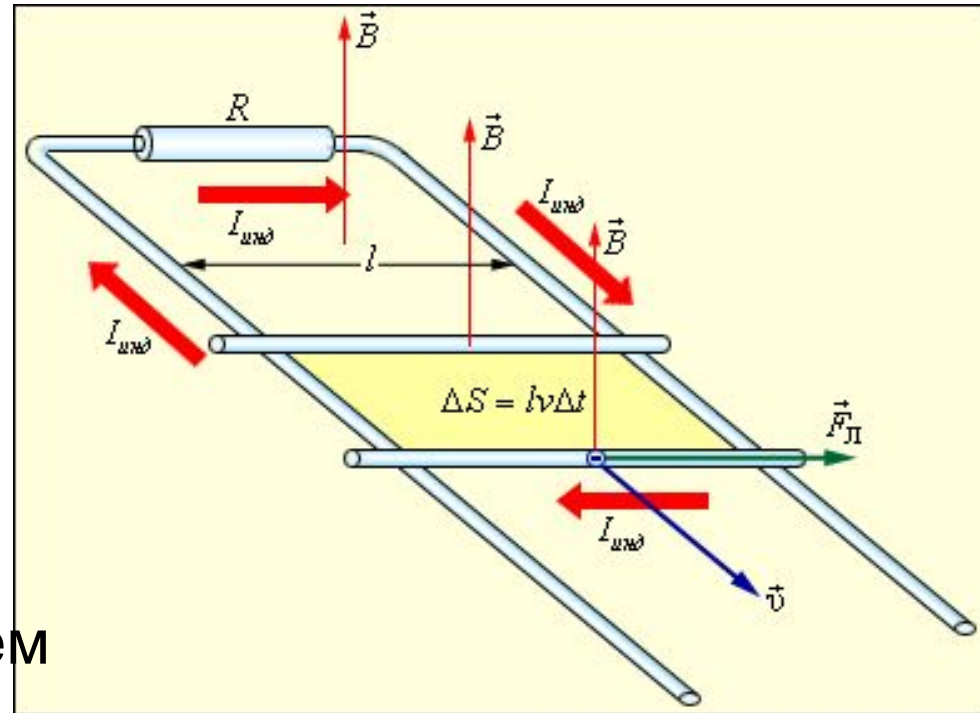
поле:

При движении проводника со скоростью v за время dt , он проходит путь dx и охватывает площадь dS :

$$dS = l \cdot dx = l \cdot v \cdot dt$$

При движении проводника в нем возникает ЭДС индукции:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = \frac{B \cdot dS \cdot \cos \alpha}{dt} = \frac{B \cdot l \cdot v \cdot dt \cdot \cos \alpha}{dt} = B \cdot l \cdot v \cdot \cos \alpha$$



В) вихревые токи (токи Фуко) в массивных проводниках:

Токи Фуко — это вихревые замкнутые электрические токи в массивном проводнике, которые возникают при изменении пронизывающего его магнитного потока.

Вихревые токи являются индукционными токами и образуются в проводящем теле либо при изменении во времени магнитного поля, в котором находится тело, либо при движении тела в магнитном поле, которое приводит к изменению магнитного потока через тело или какую-либо его часть.

Величина токов Фуко тем больше, чем быстрее меняется магнитный поток.

Проявление токов Фуко:

- Торможение движущихся проводников в магнитном поле;
- Нагревание проводников, движущихся в магнитном поле;
- Неравномерное распределение переменного тока по сечению толстого проводника, «вытеснение» быстропеременного тока на поверхность проводника (скин-эффект).

T 21.9

" ПАРЯЩИЙ " ДИСК

T 21.8

МОДЕЛЬ

АСИНХРОННОГО

ДВИГАТЕЛЯ

3. ИНДУКТИВНОСТЬ

Магнитный поток, сцепленный с контуром, пропорционален силе тока в контуре: $\Phi = L \cdot I$

L – коэффициент пропорциональности между Φ и I (коэффиц. самоиндукции)
Индуктивность, [Гн]

Индуктивность зависит от:

- геометрических свойств контура (формы, размеров);
- магнитных свойств среды, в которой он находится.

Очень большой индуктивностью обладают соленоиды с сердечниками из магнитных материалов.

Индуктивность соленоида зависит от:

- длины соленоида l ;
- площади сечения соленоида S ;
- числа витков N ;
- магнитной проницаемости сердечника μ .

Индуктивность
соленоида

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l}$$

Индуктивность соленоида

Т 22.1

**ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ
НА ИНДУКТИВНОСТЬ
СОЛЕНОИДА**

Физический смысл индуктивности: мера инертных свойств проводника (аналог массы в механике).

Чем больше индуктивность, тем сложнее изменить силу тока в проводнике.



- условное обозначение проводников, обладающих индуктивностью



4. Явление самоиндукции.

Самоиндукция – это явление возникновения ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нем силы тока.

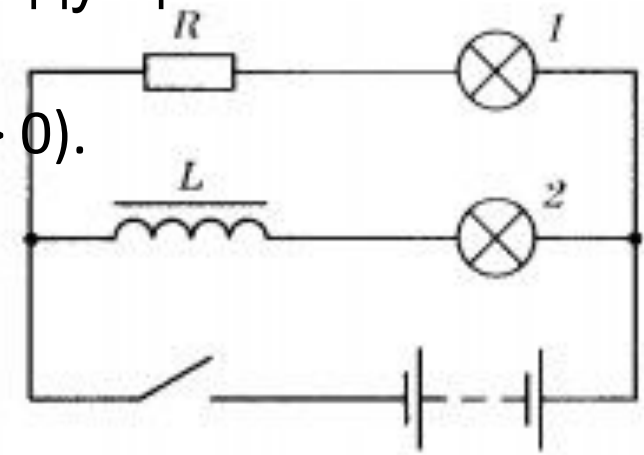
ε_{si} – ЭДС самоиндукции, [В]

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad \Phi = L \cdot I \quad \longrightarrow \quad \varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt}$$

Если $\frac{dI}{dt} > 0$ - ток нарастает, то ЭДС самоиндукции препятствует

резкому нарастанию тока ($\varepsilon < 0$):
Если $\frac{dI}{dt} < 0$ - ток убывает, то ЭДС самоиндукции препятствует

резкому убыванию тока ($\varepsilon > 0$).



T 22.3

**НАРАСТАНИЕ ТОКА
В ЦЕПИ С БОЛЬШОЙ
ИНДУКТИВНОСТЬЮ**

5. Токи при замыкании и размыкании цепи

Индукционные токи препятствуют мгновенному возникновению или исчезновению тока в цепи.

А) при размыкании цепи: $I_0 = \frac{\varepsilon}{R}$ - начальное значение тока

$$\varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt} \quad \varepsilon_{si} = IR \quad \longrightarrow \quad IR = -L \frac{dI}{dt}$$

$$-\frac{R}{L} dt = \frac{dI}{I} \quad \longrightarrow \quad -\frac{R}{L} \int_0^t dt = \int_{I_0}^I \frac{dI}{I} \quad \longrightarrow \quad -\frac{R}{L} t = \ln \frac{I}{I_0}$$

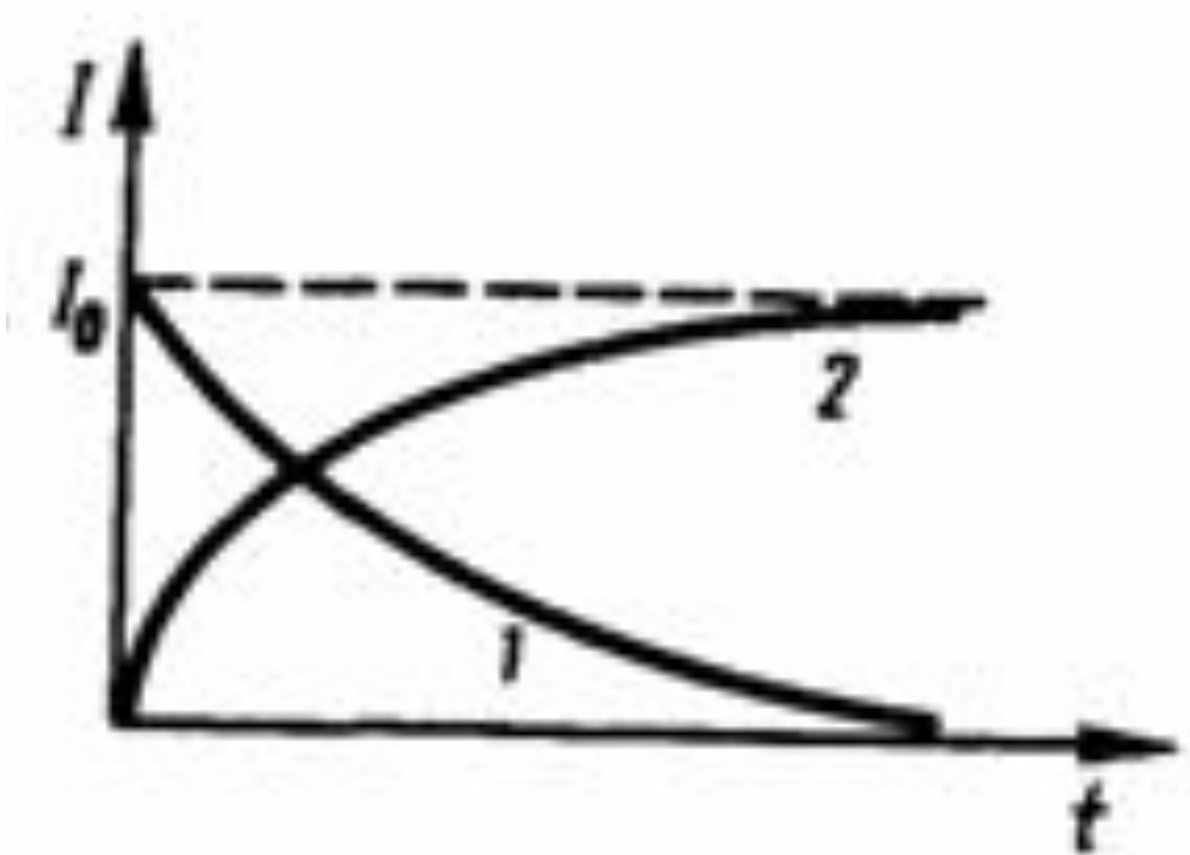
$$I = I_0 \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) \quad \text{- при размыкании ток в цепи убывает экспоненциально}$$

$$\tau = \frac{L}{R} \quad \text{- время релаксации, [с] – время, в течение которого сила тока уменьшается в e раз}$$

Б) при замыкании цепи: $I = 0$ - начальное значение тока

$I_0 = \frac{\varepsilon}{R}$ - установившееся значение тока при времени $t \rightarrow \infty$

$I = I_0[1 - \exp(-\frac{R}{L}t)]$ - при замыкании ток в цепи возрастает экспоненциально



T 22.2

**ТОКИ
ПРИ ЗАМЫКАНИИ
И РАЗМЫКАНИИ
ЦЕПИ**

6. Взаимная индукция

Взаимная индукция - это явление возникновения ЭДС индукции в одном из контуров при изменении силы тока в другом.

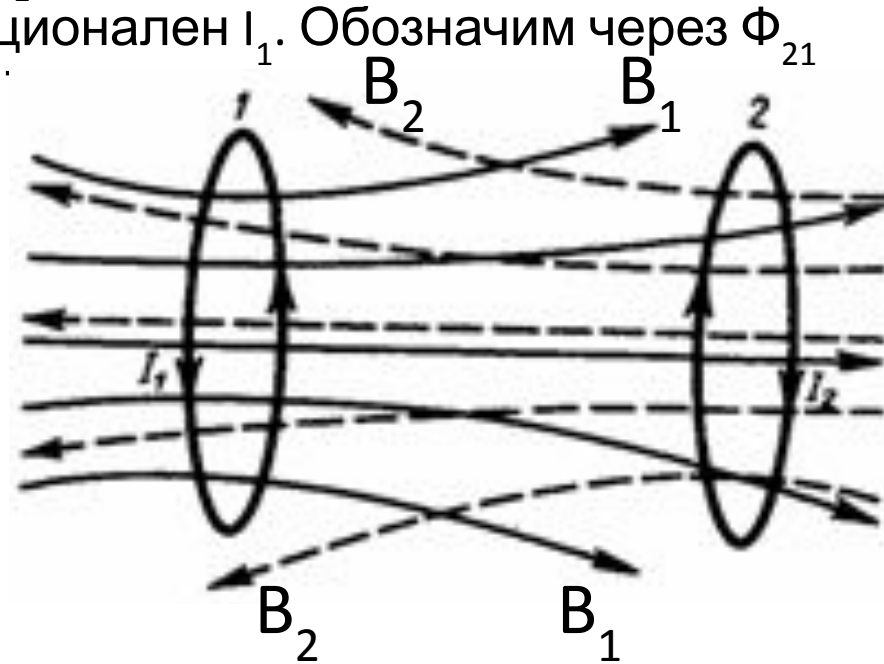
Рассмотрим два неподвижных контура (1 и 2), расположенные близко друг от друга. Если в контуре 1 протекает ток I_1 , то магнитный поток, создаваемый этим током, прямо пропорционален I_1 . Обозначим через Φ_{21} часть потока, пронизывающую контур 2.

$$\Phi_{21} = L_{21} I_1$$

где L_{21} — коэффициент пропорциональности

Если ток I_1 меняет свое значение, то в контуре 2 индуцируется ЭДС ξ_{i2} равная и противоположная по знаку скорости изменения магнитного потока Φ_{21} , который создается током в первом контуре и пронизывает второй:

$$\varepsilon_{21} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}$$



Аналогично, при протекании в контуре 2 тока I_2 магнитный поток пронизывает первый контур. Если Φ_{12} — часть этого потока, который пронизывает контур 1, то

$$\Phi_{12} = L_{12} I_2$$

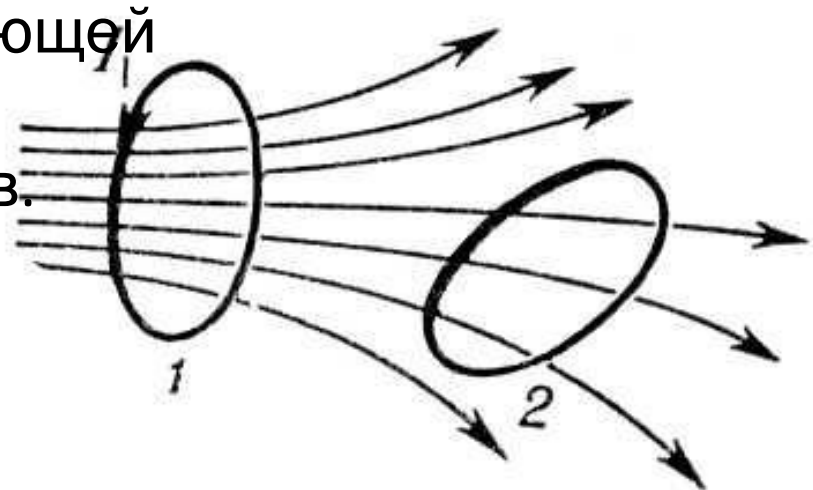
$$\varepsilon_{12} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}$$

где L_{12} — коэффициент пропорциональности

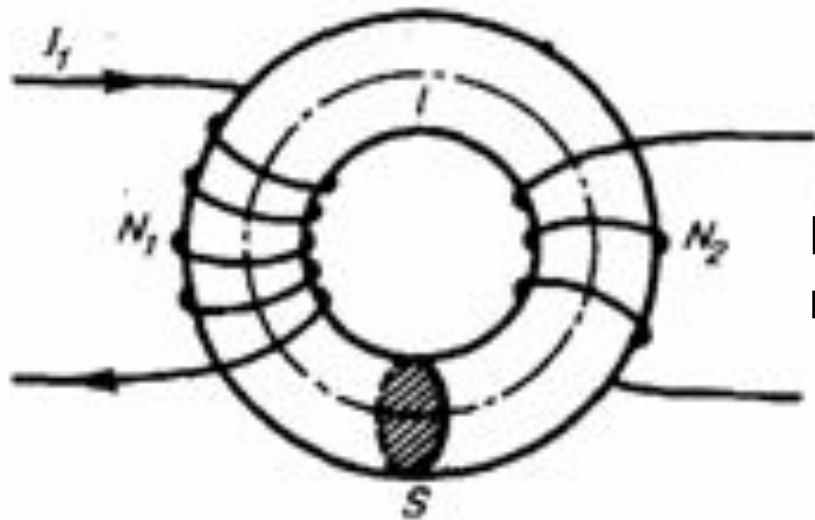
$L_{21} = L_{12}$ — коэффициент взаимной индукции

Коэффициент взаимной индукции зависит от:

- Формы и размеров контуров;
- Магнитной проницаемости окружающей среды;
- Взаимного расположения контуров.



Для двух катушек намотанных на общий тороидный



Магнитная индукция поля I катушки:

$$B = \mu\mu_0 \frac{N_1 \cdot I_1}{l}$$

Магнитный поток сквозь один виток II катушки:

$$\Phi_2 = BS = \mu\mu_0 \frac{N_1 \cdot I_1}{l} S$$

Полный магнитный поток (потокосцепление) сквозь вторичную обмотку:

$$\psi = \Phi_2 N_2 = \mu\mu_0 \frac{N_1 \cdot N_2 \cdot I_1}{l} S$$

Первая катушка – первичная обмотка,

Вторая катушка – вторичная обмотка

$$L_{21} = L_{12} = \mu\mu_0 \frac{N_1 \cdot N_2}{l} S \text{ - коэффициент взаимной индукции}$$

N_1, N_2 – число витков первой и второй катушки,

l – длина тороида по средней линии,

S – площадь поперечного сечения тороида.

7. Трансформаторы

Трансформатор (от лат. — преобразовывать) — устройство, состоящее из набора индуктивно связанных обмоток на каком-либо сердечнике или без него и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока без изменения

частоты систем.

Принцип действия трансформатора основан на явлении взаимной индукции.

Применение трансформаторов:

- ✓ Для преобразования электрической энергии в сетях;
- ✓ Для повышения (понижения) напряжения;
- ✓ Для снижения первичного тока до величины, используемой в цепях измерения, защиты, управления и сигнализации;
- ✓ Для преобразования импульсных сигналов с минимальным искажением формы импульса;
- ✓ Для повышения безопасности электросетей, при случайных одновременных прикасаниях к земле и токоведущим частям.



Однофазный трансформатор

Тороидальный
трансформатор

Тяговый трансформатор

Принцип работы

трансформатора:

В первичной обмотке, содержащей N_1 витков, протекает переменный ток I_1 , он создает в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток Φ . Этот поток почти полностью пронизывает витки вторичной обмотки, содержащей N_2 витков.



$$\varepsilon_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{— ЭДС индукции в первичной обмотке;}$$

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{— ЭДС индукции во вторичной обмотке;}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{N_2}{N_1} \varepsilon_1$$

$k = N_2/N_1$ — коэффициент трансформации;

Из закона сохранения энергии:

$$\varepsilon_1 I_1 \approx \varepsilon_2 I_2 \quad \longrightarrow \quad \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

$N_2/N_1 > 1$ — повышающий трансформатор (увеличивает напряжение и уменьшает силу тока);

$N_2/N_1 < 1$ — понижающий трансформатор

8. Энергия магнитного поля

Магнитное поле является носителем энергии, которая равна работе, затраченной током на создание этого поля.

$$dA = F_A \cdot dx = IBl \cdot dx = IB \cdot dS = I \cdot d\Phi$$

$dA = I \cdot d\Phi$ — элементарная работа по перемещению контура с током в магнитном поле на расстояние dx

При изменении тока на dI , сцепленный с ним магнитный поток изменится на $d\Phi$.

$$d\Phi = L \cdot dI$$

Работа по созданию магнитного потока Φ будет равна:

$$A = \int dA = \int_0^I LI \cdot dI = \frac{LI^2}{2}$$

$$W_m = \frac{LI^2}{2} \text{ - энергия магнитного поля, созданного током } I$$

Энергия магнитного поля соленоида сосредоточена внутри соленоида и равна:

$$W_{\text{сол}} = \frac{LI^2}{2} = \frac{I^2}{2} \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l}$$

$Sl = V$ - объем соленоида

$$B = \mu\mu_0 \frac{NI}{l} \quad \rightarrow \quad I = \frac{Bl}{\mu\mu_0 N}$$

$$W_{\text{сол}} = \frac{B^2 l^2}{2\mu^2 \mu_0^2 N^2} \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l} = \frac{B^2 Sl}{2\mu\mu_0}$$

$$W_{\text{сол}} = \frac{B^2 V}{2\mu\mu_0}$$

Поле внутри соленоида однородное. Энергия, приходящаяся на единицу объема соленоида – объемная плотность энергии:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} \quad \text{- объемная плотность энергии магнитного поля}$$

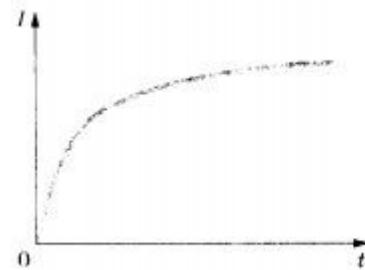
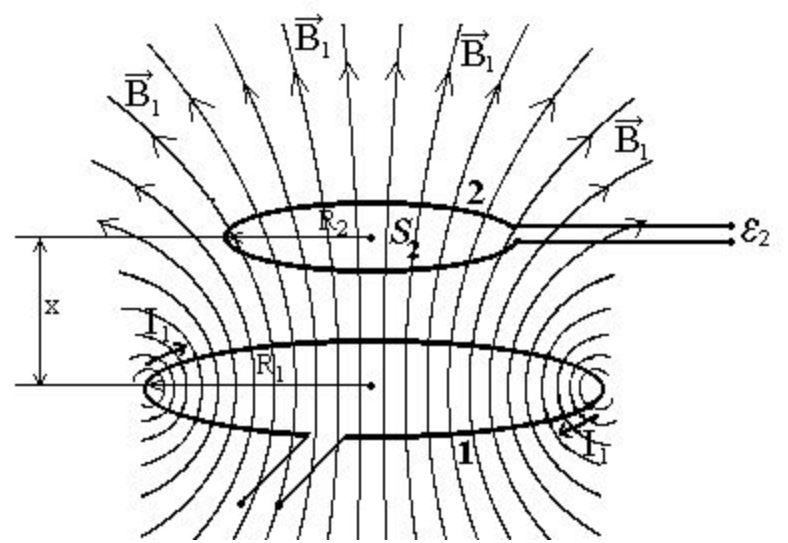
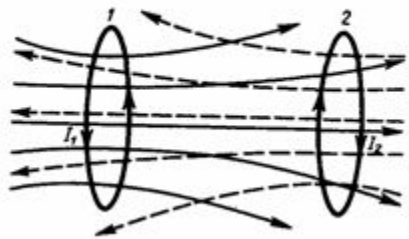


Рис. 2.14

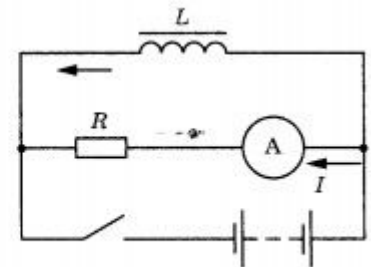


Рис. 2.15